

Analyse nicht stationärer Signale in Energiesystemen

P. Janik, Z. Leonowicz, P. Schegner

Technische Universität Dresden

Institut für Elektroenergieversorgung und Hochspannungstechnik

Mommensenstraße 13

01069 Dresden

schegner@eev.et.tu-dresden.de

Zusammenfassung

Klassische Methoden der Spektralanalyse von diskret abgetasteten Signalen mit vielen spektralen Anteilen basieren meistens auf der Fourier-Transformation. Die Abschätzung der Frequenzanteile des Signals mittels der Scheitelwerte des Spektrums hat aber verschiedene Nachteile. Die Länge des Fensters und die Phase der Spektralanteile im Signal beeinflussen das Ergebnis, auch wenn kein Rauschen vorhanden ist.

Wir präsentieren hier eine andere Vorgehensweise. Die Frequenzanalyse wird mit Hilfe der Wigner – Ville – Distribution (WVD) durchgeführt. Die so gewonnene Zeit – Frequenz-Darstellung hat eine sehr gute Auflösung sowohl im Zeit - als auch im Frequenzbereich. Die gleiche Aufgabe der Zeit-Frequenzdarstellung wird mit der *Mini-Norm* (Unterraummethode) Methode realisiert. Die Genauigkeit und die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Phase des Signals wurden untersucht und mit der Frequenzanalyse der FFT verglichen. Die angesprochenen Methoden wurden auch mit nicht stationären, zusammengesetzten Signalen getestet. Als Beispiel dieser Art der Signale wurden die Verläufe aus stromrichter gespeisten Antrieben und eines Kurzschlusses im Übertragungsnetz genommen.

Schlüsselworte: Spektralanalyse, Wigner – Ville-Distribution, Mini-Norm, Leistungsumrichter, Störungserkennung, Übertragungsleitung

1 Methoden der Spektrumanalyse

Die Spektralanalyse von diskret abgetasteten Signalen wird meistens mittels FFT durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist rechnerisch effizient, und liefert gute Ergebnisse für eine große Klasse von Signalen. Viele Begrenzungen der Methode können aufgelistet werden:

- Frequenzauflösung, d.h. die Fähigkeit verschiedene Signale mit nahe beieinander liegenden Frequenzen zu unterscheiden.
- Begrenzungen wegen der Fensterung der Eingangssignale

Fourier-Methoden sind nur dann genau, wenn die Abtastintervalle gleich einer vielfachen der

Periode der Grundfrequenz ist. Wenn das zu untersuchende Signal Interharmonische beinhaltet, kann deren Periode sehr lang sein und zusätzlich mit der Zeit variieren. Die Fensterung wird als *Leakage* –Effekt im Spektrum sichtbar. Die Energie des Hauptlappens „sickert“ in die Nebenlappen und verwäscht und verzerrt die spektralen Anteile des Signals.

Die Begrenzungen sind besonders lästig, wenn kurzzeitige Zeitaufnahmen analysiert werden sollen. Viele Prozesse sind jedoch kurz, oder haben langsam variierende Spektren, die nur für kurze Zeit als konstant angesehen werden können.

In der Zeit sich schnell verändernde Spektren der diskret abgetasteten Signalen werden meistens mit dem Spektrogramm ausgewertet – dafür wird die kurzzeitige Fouriertransformation (STFT) verwendet. Eine andere Alternative ist ein Scalogramm, das man mit Hilfe der Wavelet-Transformation erhält. Eine andere Variante der Distribution ist die Wigner-Ville (WV) Distribution. Sie zeigt eine bessere Frequenzkonzentration und eine kleinere Phasenabhängigkeit als die Fourieranalyse.

Der Rechenaufwand der zu FFT alternativen Methoden kann aber wesentlich größer sein.

Die neusten Methoden der Spektralanalyse basieren auf dem algebraischen Konzept der Unterräume, so dass sie als Unterraummethode bezeichnet werden sind [8]. Die spektrale Auflösung dieser Methoden hängt theoretisch von dem *signal to noise ratio* (SNR) nicht ab. Das Modell des Signals ist eine Summe von zufällig gewählten Sinuskurven und Rauschen mit einer bekannten Kovarianzfunktion. Zum ersten mal hat Pisarenko beobachtet, dass die Nullstellen der Z-Transformation des Eigenvektors der Kovarianzmatrix, der minimalen Eigenwert entspricht, sich auf dem Einheitskreis befinden. Die Winkelposition entspricht der Frequenz der Sinuskurven. Im Laufe weiterer Studien wurde gezeigt, dass die Eigenvektoren in zwei Gruppen aufgeteilt werden können. In eine Gruppe die den Signalraum und eine andere die den orthogonalen Rauschraum aufspannen. Die den Rauschraum aufspannenden Eigenvektoren charakterisieren sich durch die kleinsten Eigenwerte, die gleich der Energie des Rauschens sind. Eine der wichtigsten

Berechnungsmethoden ist die *Mini-Norm* Methode. Sie basiert auf dem Pisarenko - Ansatz der Aufteilung der abgetasteten Werte in reine Signal- und Rauschskomponente.

Eine andere Möglichkeit der Abschätzung des Spektrums des Signals ist die Anwendung der Wigner - Ville - Distribution. Das Wigner – Ville - Spektrum der analogen und digitalen Signale mit zeitbegrenzter Fensterung zeigt bessere Energiekonzentration und eine geringere Phasenabhängigkeit als Fourierspektren. Diese Distribution ist robust gegen Rauschen. Sie eignet sich dank der guten Zeitauflösung besonders zur Analyse von nicht stationären Signalen, besser als traditionelle Ansätze wie FFT, STFT.

2 Unterraummethoden

Es wird angenommen, dass die Datenmenge aus M komplexen Sinuskurven mit gaußischem Rauschen besteht [8]

$$\underline{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^M A_i \mathbf{s}_i + \eta ; \quad A_i = |A_i| e^{j\phi_i} \quad (1)$$

Die $N \times N$ Autokorrelationsmatrix für $N > M+1$ hat die Form:

$$\mathbf{R}_x = \sum_{i=1}^M E \{ \underline{A}_i \underline{A}_i^* \} \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^T + \sigma_0^2 \mathbf{I} = \mathbf{R}_{signal} + \mathbf{R}_{noise} \quad (2)$$

(mit $E \{ \dots \}$ -Erwartungswert, $*$ - konjugiert komplex) und wird aus der Summe der Autokorrelationsmatrizen des Signals und des Rauschens berechnet.

Die Frequenzinformation ist in der \mathbf{R}_{signal} - Matrix vorhanden. Die Zerlegung dieser Matrix basiert auf Eigenvektoren und Eigenwerten. Den M größten Eigenwerten entsprechende Eigenvektoren beinhalten die Information über die Signalparameter.

Um die Information zu entnehmen kann die Orthogonalität benutzt werden. Die Signalvektoren sind zu allen Rauschvektoren orthogonal.

2.1 Mini-Norm Methode

Die Mini – Norm Methode [8] beinhaltet die Projektion des Signalvektors (1) auf den ganzen Rauschunterraum. Vorausgesetzt wird eine zufällige Folge $\underline{\mathbf{x}}$, zusammengesetzt aus M unabhängigen, verrauschten Signalen.

Wenn das Rauschen weiß ist, kann die Korrelationsmatrix des Signals wie folgt definiert werden

$$\mathbf{R}_x = \sum_{i=1}^M E \{ \underline{A}_i \underline{A}_i^* \} \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^T + \sigma_0^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

Die $N-M$ kleinste Eigenwerte der Korrelationsmatrix (Die Matrixdimension $N > M+1$) entsprechen dem Rauschunterraum und die M größten (alle größer als die σ_0^2 -Rauschvarianz) entsprechen dem Signalunterraum.

Die Eigenvektormatrizen werden definiert als:

$$\mathbf{E}_{signal} = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \dots \quad \mathbf{e}_M] \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_{noise} = [\mathbf{e}_{M+1} \quad \mathbf{e}_{M+2} \quad \dots \quad \mathbf{e}_N] \quad (5)$$

Die Mini – Norm Methode verwendet ein \mathbf{d} - Vektor zu Frequenzbestimmung. Dieser zum Rauschunterraum gehörende Vektor hat die kleinste euklidische Norm und sein erstes Element ist gleich eins. Die Voraussetzungen sind in den folgenden Gleichungen zusammengefasst:

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= \mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{d} \\ \mathbf{d}^{*T} \mathbf{l} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

wobei: $\mathbf{l} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots]^T$

Das kann auch in einer Gleichung dargestellt werden:

$$\mathbf{d}^{*T} \mathbf{l} = (\mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{d})^{*T} \mathbf{l} = \mathbf{d}^{*T} \mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{l} = 1 \quad (7)$$

Ein Lagrangian wird gebildet:

$$L = \mathbf{d}^{*T} \mathbf{d} + \mu (1 - \mathbf{d}^{*T} \mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{l}) + \mu^* (1 - \mathbf{l}^T \mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{d}) \quad (8)$$

Der Gradient der Gleichung (8) hat die Form:

$$\nabla_{\mathbf{d}} L = \mathbf{d} - \mu \mathbf{E}_{noise} \mathbf{E}_{noise}^{*T} \mathbf{l} = \mathbf{0} \quad (9)$$

wobei μ so gewählt wird, dass das erste Element des \mathbf{d} - Vektors gleich eins ist.

Um das zu erreichen wird \mathbf{E}_{noise} wie folgt dargestellt:

$$\mathbf{E}_{noise} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^{*T} \\ \mathbf{E}'_{noise} \end{bmatrix} \quad (10)$$

wobei \mathbf{c}^{*T} die obere Reihe der Matrix ist. Das erste Element des \mathbf{d} - Vektors ist $\mu \mathbf{c}^{*T}$.

Abschließend kann der \mathbf{d} - Vektor dargestellt werden:

$$\mathbf{d} = \frac{1}{\mathbf{c}^{*T} \mathbf{c}} \mathbf{E}_{noise} \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 \\ (\mathbf{E}'_{noise} \mathbf{c}) / (\mathbf{c}^{*T} \mathbf{c}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Das Pseudospektrum definiert mit dem \mathbf{d} – Vektor ergibt:

$$\hat{P}(e^{j\omega}) = \frac{1}{|\mathbf{w}^{*T} \mathbf{d}|^2} = \frac{1}{\mathbf{w}^{*T} \mathbf{d} \mathbf{d}^{*T} \mathbf{w}} \quad (12)$$

wobei \mathbf{w} wie folgt definiert wird:

$$\mathbf{s}_i = [1 \quad e^{j\omega_i} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\omega_i}]^T \quad (13)$$

Auch zeitvariante Signale können mit der Mini-Norm Methode untersucht werden. Ähnlich wie bei der kurzzeitiger Fouriertransformation (STFT) wird ein zeitvariantes Signal mit Hilfe der temporären Fensterfunktion in kleine Abschnitte aufgeteilt. Jedes Segment wird einzeln untersucht, wobei eine Überlappung der Segmente stattfindet. Der Nenner der Gleichung (12) wird für jeden Zeitmoment berechnet. Zeitkontinuierliche Berechnung der Gleichung (12) kann als eine kontinuierliche Schätzung der Frequenz des Signals angesehen werden [7].

3 Wigner-Ville Darstellung

Die Wigner- Ville - Distribution (WVD) [3] ist eine Zeit – Frequenzdarstellung, die mit der Gleichung 14 definiert wird:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (14)$$

wobei: t – Zeit, ω - Frequenz, $*$ - konjugiert komplex.

Die Wigner- Ville - Distribution ist eine zweidimensionale Funktion, die die Frequenzanteile eines Signals als eine Zeitfunktion beschreibt. Sie hat viele vorteilhafte Eigenschaften:

- Die Eigenschaft der Momentanfrequenz ω besagt, dass zum Zeitpunkt t die mittlere Momentanfrequenz von $W_x(t, \omega)$ der mittleren Momentanfrequenz des Signals [2] gleich ist.
- Bei der Anwendung der Wigner – Ville - Distribution werden die Randbedingungen sowohl für die Zeit als auch die Frequenz erfüllt. Es kann gezeigt werden [1], dass [1] die in $W_x(t, \omega)$ enthaltene Energie, der Energie des ursprünglichen Signals entspricht

Die diskrete Pseudo- Wigner - Ville Distribution wird mit einem gleitenden, symmetrischen Fenster $h(\tau)$ begrenzter Länge durchgeführt.

$$W_{xh}(n, k) = 2 \sum_{\tau=-L}^L x(n+\tau) x^*(n-\tau) h(\tau) h^*(-\tau) e^{-j4\pi k\tau / N} \quad (15)$$

wobei das Fenster $h(\tau)$, die Bedingung $h(\tau)=0$; $|\tau|<L$ erfüllt. Die Variablen n und k beschreiben die diskrete Zeit und Frequenz.

Die kurzzeitige Fouriertransformation (STFT) war das erste Werkzeug zu Signalanalyse in dem zusammengesetzten Zeit - Frequenzbereich. Der größte Nachteil der STFT ist ein *trade-off* zwischen der Zeit- und Frequenzauflösung. Die WVD ist von solcher Eigenschaft frei, hat aber andere unerwünschte Aspekte. Ein Hauptnachteil ist die Interferenz der Kreuzkomponenten. Die WVD einer Summe von mehreren Spektralanteilen ergibt eine lineare Kombination der Eigen- und Kreuzkomponenten. Jedes Paar der Signalkomponente bildet eine zusätzliche Kreuzkomponente im Spektrum, daher kann das berechnete Spektrum verwirrend sein. Traditionell werden die Kreuzkomponenten als unerwünscht [1] angesehen und sollten entfernt werden. Das ist nicht ganz richtig. Manche Typen der Kreuzkomponenten (z.B. gebildet durch zwei gaußschen Funktionen, deren Zeit- und Frequenzzentren weit voneinander liegen, wenn die Kreuzkomponente besonders oszillierend ist) haben den Durchschnittswert fast gleich Null und begrenzten Einfluss auf die Zeitrandbedingungen und andere Eigenschaften. In anderen Fällen, wenn eine Kreuzkomponente weggelassen wird, kann die

Energie der Frequenzdarstellung verkleinert werden.

Eine Methode der Minimierung des Einflusses der Kreuzkomponenten ist die Anwendung des Tiefpassfilters. Durch die Glättung wird aber die Frequenzauflösung verschlechtern und andere nützliche Eigenschaften der Transformation werden beeinträchtigt [1].

Eine andere Methode der Minimierung der Interferenz von WVD ist die Verwendung analytischen Signale. In dieser Weise vermeidet die resultierende WVDa alle, mit der negativen Frequenz verbundene Kreuzkomponenten. Die analytische Funktion unterscheidet sich von dem originalen Signal, z.B. seine momentane Eigenschaften können sich von dem originalen Signal drastisch unterscheiden [5]. Die WVDa reduziert die Kreuzanteilinterferenz mit der Beeinträchtigung vielen nützlichen Eigenschaften.

4 Antriebssimulation

In den letzten Jahren wurden die Simulationsprogramme für komplizierte Elektrische Systeme wesentlich verbessert. Das EMTP-ATP Programm [4] (Electromagnetic Transient Program – Alternative Transient Program) wird zur Simulation ein- und dreiphasigen Systemen der Antriebs- und Energietechnik.

In diesem Artikel werden die Ergebnisse der Simulation eines Antriebes gezeigt. Nachgebildet wurde ein 3 kVA Umrichter mit PWM und einer Modulationsfrequenz von 1 kHz nachgebildet. An den Umrichter wurde eine zweipolige Asynchronmaschine mit den folgenden Parametern gespeist. ($U_n=220$, $P_n=1,1$ kW, $s=6\%$, $\cos\phi=0,81$, $n=1410\text{min}^{-1}$) (Abb. 1).

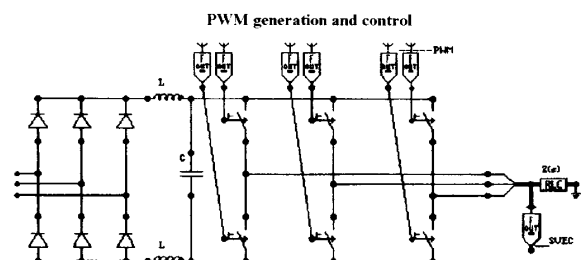


Abbildung 1 Simulierter geregelter Antrieb mit PWM – Umrichter

Charakteristische RC-Dämpfungselemente wurden an der Gleich- und Wechselrichterseite berücksichtigt. Zur Auslegung des Zwischenkreises wurden typische Parameter eines 3kVA Umrichter verwendet.

4.1 Komplexer Raumzeiger

Der komplexe Raumzeiger ist in [6] beschrieben

$$f_p = f_\alpha + j \cdot f_\beta \quad (16)$$

wobei

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_R \\ f_S \\ f_T \end{bmatrix} \quad (17)$$

Er beschreibt neben der positiven Komponente auch die negative Komponente und die harmonische und nicht harmonische Signalkomponenten.

5 Untersuchungen

5.1 Die Spektralanalyse der verrauschten, stationären Signale

Ein Vergleich zwischen der mittels WVD, der Mini -Norm Methode und dem Spektrogramm (FFT) gewonnener Information über Frequenzanteile wird gezeigt. Diese Methoden wurden zur Untersuchung eines Zweikomponentensignals mit gaußischem Rauschen verwendet. Es wird eine Signalsequenz für ein bestimmtes Rauschniveau realisiert. Jedes Experiment wurde 100 mal wiederholt. Dabei wurde die Position des Fensters variiert, was 100 gleichmäßig verteilten Anwahl der Phase der Sinuskurve entspricht. Um die Ergebnisse der einzelnen Methoden zu quantifizieren und untereinander vergleichen zu können wurde ein Mittelwert der quadratischen Abweichung der Frequenzbestimmung eingeführt.

$$e = \frac{1}{Q} \sum_{m=1}^Q \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K (\bar{f}_{em,n} - f_{m,n})^2 \quad (18)$$

wobei: Q – die Anzahl der Signalkomponente
K – die Anzahl der Versuche (K=100)
 f_m – die aktuelle Frequenz der m-ten Komponente
 \bar{f}_{em} – die berechnete Frequenz der m-ten Komponente., ausgesucht aus dem Scheitelwert des zur m-ten Frequenz am nächsten liegenden Frequenzwertes in dem n-ten Versuch.

Signal zu Rauschen Verhältnis (SNR)
SNR wird als

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{signal}^2}{\sigma_0^2} \right) \quad (19)$$

definiert.

Die Ergebnisse der verschiedenen Frequenzanalysemethoden (Spektrogramm PSD, WVD, Mini-Norm Methode MN) in Abhängigkeit von der Länge des Fensters und des Rauschens,

ausgedrückt als Fehler der Frequenzbestimmung wurde in den Abb. 2, 3, 4 dargestellt. Bei allen drei Methoden der Fehler wird kleiner, wenn das Fenster länger und das Rauschniveau kleiner werden. Das Spektrum der Leistung des Signals beinhalten den größten Gesamtfehler. Die gewonnenen Ergebnisse der WVD sind deutlich besser, besonders bei kleinem SNR. Mini-Norm Methode ist besonders für Aufgaben, wo kleine Fensterlänge und mäßiges Rauschen vorausgesetzt werden können, geeignet. Diese Methode zeigt fast keine Phasenabhängigkeit.

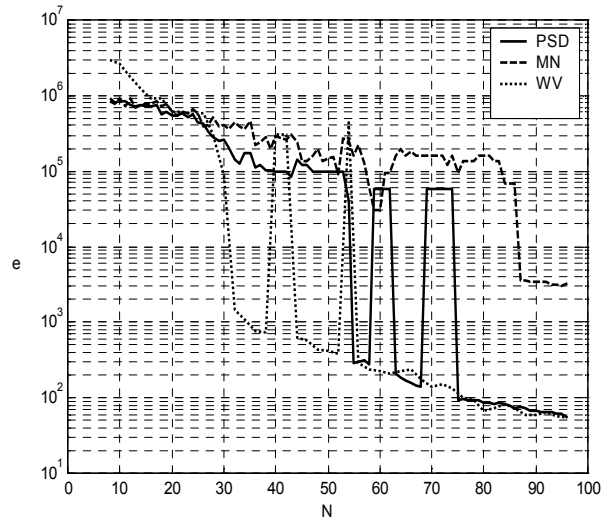


Abbildung 2 Fehler e der Frequenzbestimmung in Abhängigkeit von der Länge des Fensters. SNR=0 dB

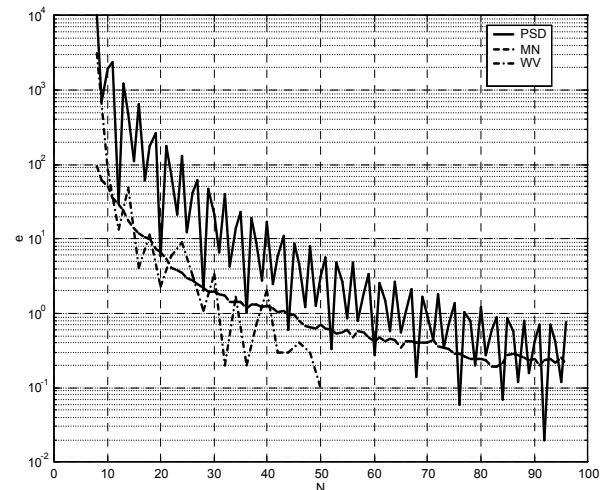


Abbildung 3 Fehler e der Frequenzbestimmung in Abhängigkeit von der Länge des Fensters. SNR=30 dB

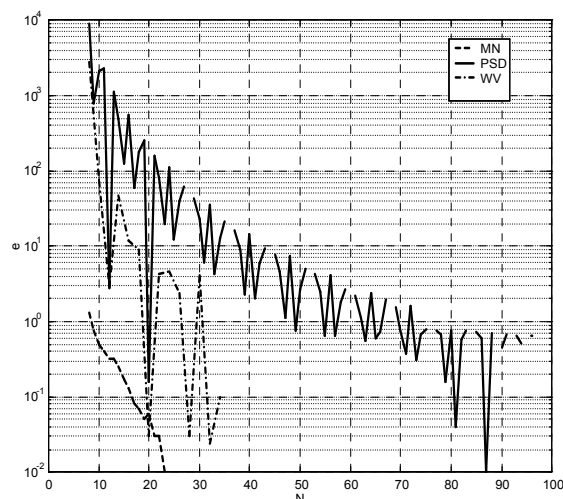


Abbildung 4 Fehler e der Frequenzbestimmung in Abhängigkeit von der Länge des Fensters. SNR=50 dB

6 Zeit – Frequenz - Darstellung des Raumzeigers.

Für diese Untersuchung werden zwei unterschiedliche Fehlerzustände analysiert.

- a) Gestörter Betrieb des Antriebes. Der Hauptwiderstand der Maschine hat sich vergrößert auf 100Ω . Die Hauptfrequenz des Umrichters beträgt 120 Hz, es wird mit 20 kHz abgetastet.

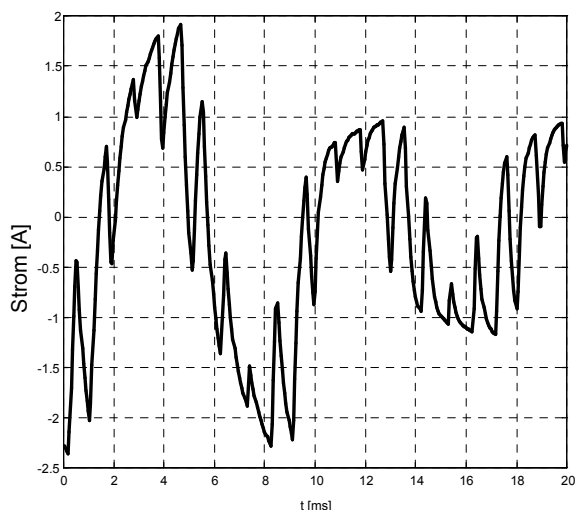


Abbildung 5 Strom eines Leiters bei Fehlfunktion a

- b) Gestörter Betrieb des Antriebes. Es liegt ein Kurzschluss zweier Phasen in der Maschine vor. Die Hauptfrequenz des Umrichters beträgt 60 Hz, es wird mit 20 kHz abgetastet.

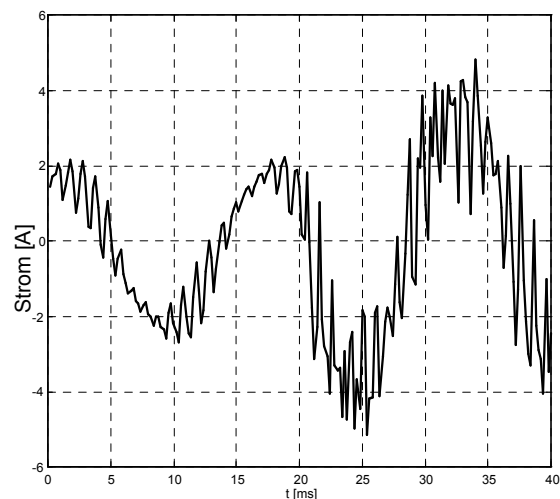


Abbildung 6 Strom eines Leiters bei Fehlfunktion b

Das Spektrogramm und Mini – Norm Zeit - Frequenz Darstellung des zeitvarianten Signals (Abb. 5, 6) wurde auf den Abb. 7-15 dargestellt. Jede Linie der Zeit-Frequenzdarstellung wurde mit 40 Abtastwerten berechnet.

Bei Fehlfunktion a ergeben sich folgende Bilder:

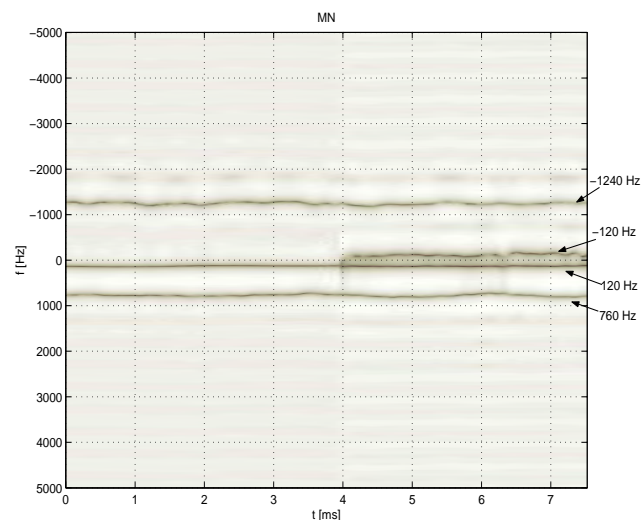


Abbildung 7 Ergebnis der Mini-Norm-Darstellung für die Fehlfunktion a, berechnet wird ein Ausschnitt des Signals von 6 bis 13 ms

In den Abb. 7-10 ist eine einfache Unsymmetrie zu sehen. Nach dem Fehler ist eine negative 120 Hz Komponente zu erkennen, die auf die Unsymmetrie zurückzuführen ist.

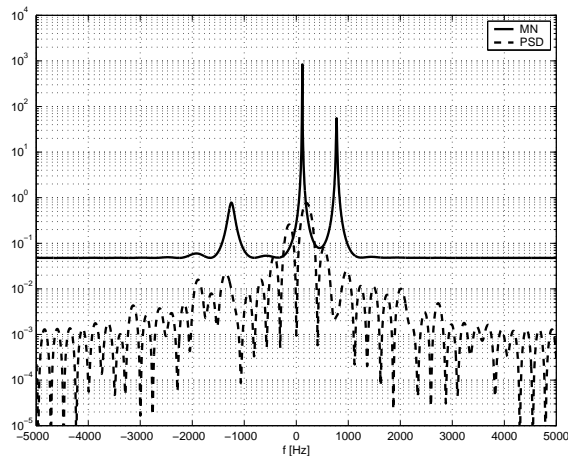


Abbildung 8 Ein Zeitschnitt der MN und PSD Signaldarstellung für $t=2$ ms

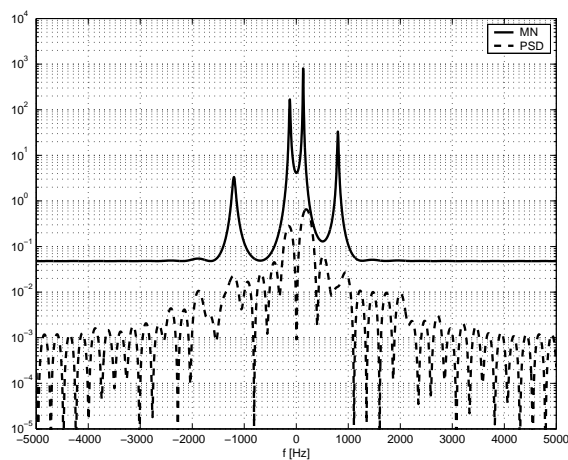


Abbildung 9 Ein Zeitschnitt der MN und PSD Signaldarstellung für $t=6$ ms

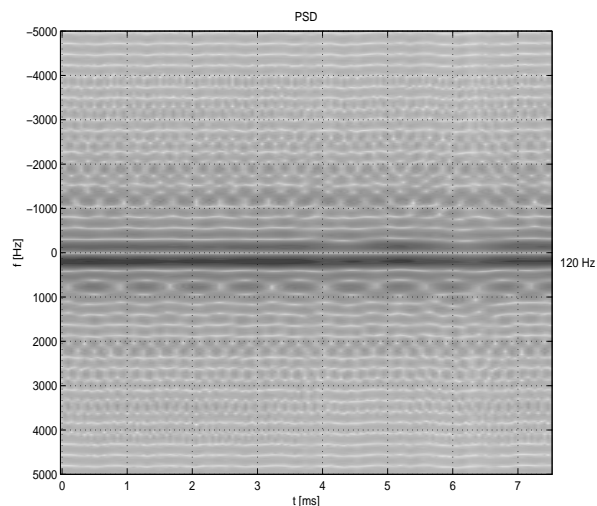


Abbildung 10 Spektrogramm des Signals von Abb. 5

Zu sehen sind auch die positiven Intermodulationskomponenten mit der Frequenz 760 Hz ($1000 \text{ Hz (PWM - Modulationsfrequenz)} - 2 \cdot 120 \text{ Hz} = 760 \text{ Hz}$) und eine negative Intermodulationskomponente mit der Frequenz -

1240 Hz ($1000 \text{ Hz} + 2 \cdot 120 \text{ Hz} = 1240 \text{ Hz}$). Spektrogramm zeigt nur die Hauptfrequenz 120 Hz.

Bei Fehlfunktion b ergeben sich folgende Bilder:

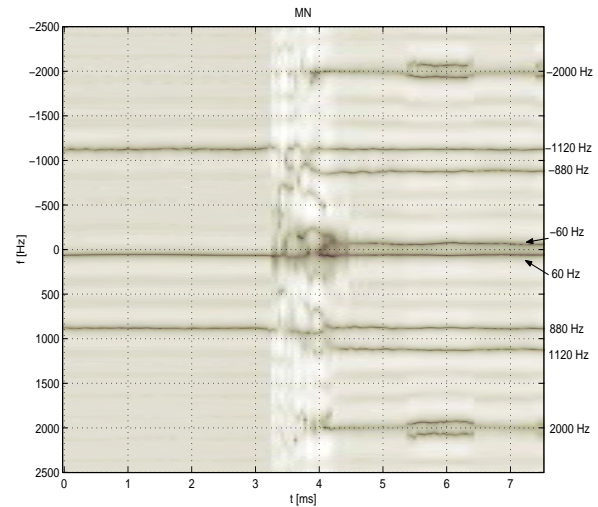


Abbildung 11 Ergebnis der Mini-Norm-Darstellung für die Fehlfunktion b, berechnet wird ein Ausschnitt des Signals von 6 bis 13 ms

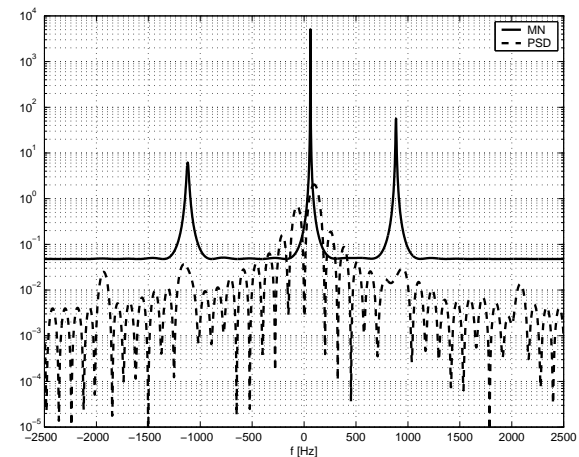


Abbildung 12. Ein Zeitschnitt der MN und PSD Signaldarstellung für $t=2$ ms.

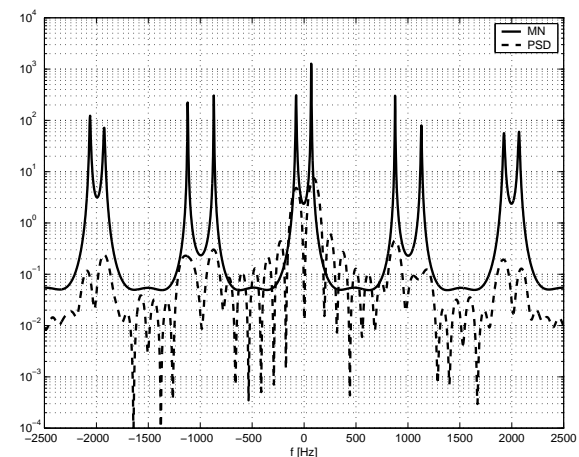


Abbildung 13 Ein Zeitschnitt der MN und PSD Signaldarstellung für $t=6$ ms

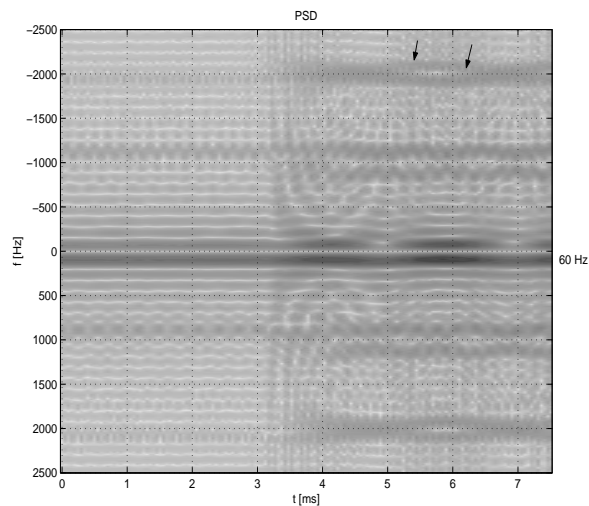


Abbildung 14 Spektrogramm des Signals von Abb. 6.

Im Fall des Kurzschlusses in inneren des Motors (Abb. 11-14) sind die zusätzlichen Intermodulationskomponenten zu sehen.

7 Wigner- Ville - Distribution des Kurzschlussverlaufes

Die untersuchte Kurve wurde während eines Leiter-Erde Kurzschlusses auf einer Übertragungsleitung aufgenommen. Zu dem Zeitpunkt des Kurzschlusses ist eine exponential abfallende Komponente mit 130 Hz zu sehen (Abb. 15).

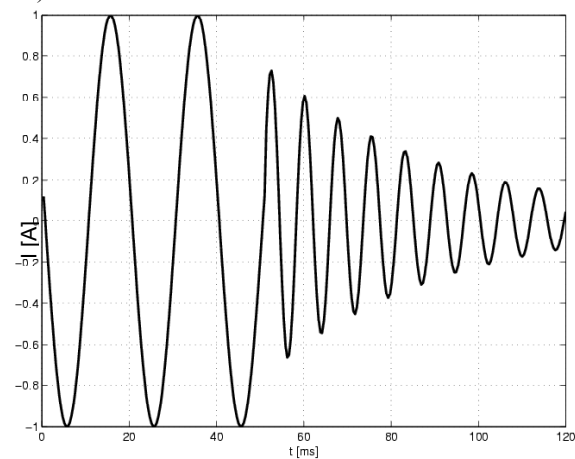


Abbildung 15 Sekundärseitige Strom eines Leiters bei einem einpoligen Fehler

Die Wigner – Ville – Distribution des Signals aus Abb. 15 wird in Abb. 16 gezeigt. Analytische Form des Signals wurde benutzt. WVD bietet die Möglichkeit an, die Frequenz- und Amplitudenänderungen nicht stationären Signalen. Im Abb. 17 ist die berechnete momentane Frequenz des Signals vom Abb. 15 dargestellt.

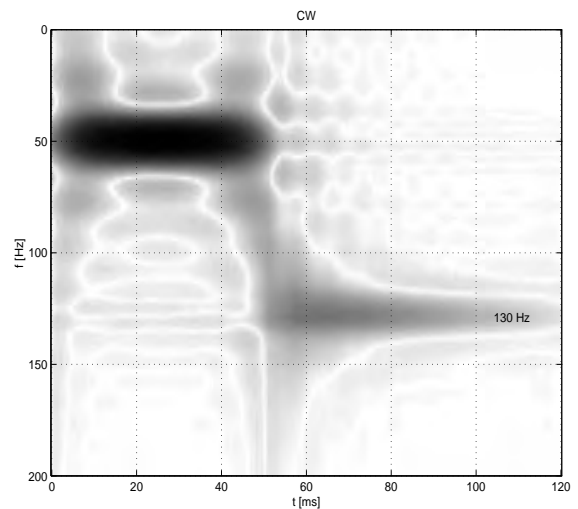


Abbildung 16 Wigner – Ville - Distribution des Signals von Abb. 15

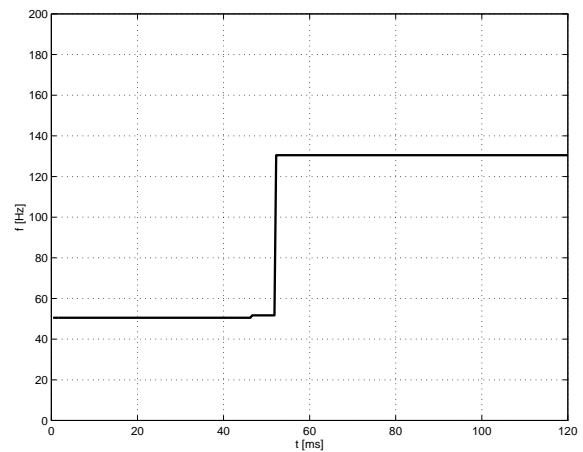


Abbildung 17 Momentane Frequenz des Signalanteils mit der maximalen Amplitude

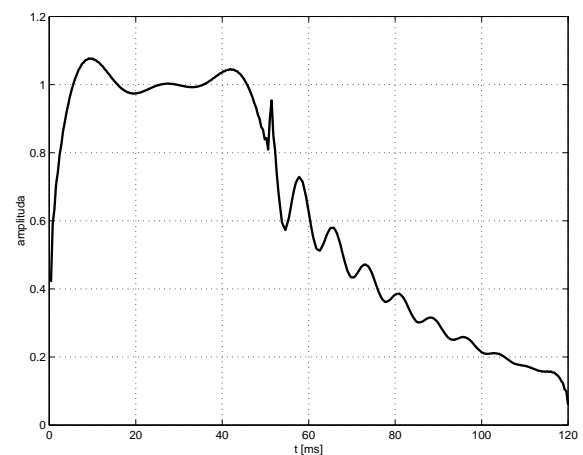


Abbildung 18 Momentane Amplitude des Signals von Abb. 15

Im Bild 18 wurde die berechnete momentane Amplitude (Leistung) der Hauptkomponente des Signals dargestellt. Beide Darstellungen haben eine gute Korrelation mit den echten Änderungen des untersuchten Signals.

8 Schlussfolgerung

Moderne Umrichter generieren viele Harmonischen. Große leistungselektronische Umrichter können auch nicht charakteristische Harmonische und Zwischenharmonische erzeugen. Standardwerkzeuge der spektralen Analyse basieren auf der FFT. Dabei wird die Annahme gemacht, dass nur Harmonische im Signal auftreten und das Frequenzintervall mit 20 ms, (50 Hz) festgelegt ist. Bei Interharmonischen kann ein Intervall lang und veränderlich sein.

Die Frequenzen einer Stromrichtergespeisten Maschine lassen sich leicht mit dem Raumzeiger darstellen. Das ist ein gutes Werkzeug der Beobachtung und Analyse der Antriebe. Das Spektrum des Raumzeigers und des realen Signals wurden in verschiedenen Betriebszuständen mit der Wigner – Ville Distribution und Mini - Norm Methode untersucht.

Diese neuen Methoden haben sich effizienter als die FFT gezeigt. Die Erkennung nicht regulären Frequenzen kann bei der Überwachung der Antriebssysteme behilflich sein. WVD bietet auch die Möglichkeit der Beobachtung der Frequenz der nicht stationären Signale.

Diese Arbeit wurde teilweise vom North Atlantic Treaty Organization unterstützt (Advanced Science Fellowship for Dr. Z. Leonowicz).

Literaturverzeichnis

- [1] Boashash B.: „Note on the use of the Wigner distribution for time-frequency signal analysis", *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, Vol 36, No 9, 1988, pp. 1518-1521
- [2] Mecklenbrauker W.F.G.: „The Wigner distribution--A tool for time--frequency signal analysis--Part II: Discrete--time signals", *Philips J. Res.*, Vol 35, 1980, pp. 276-300.
- [3] Cohen L.: *Time-Frequency Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- [4] EMTP-ATP Rule Book, Canadian-American User Group, 1987-1992.
- [5] Martin W., Flandrin P., „Wigner-Ville Spectral Analysis of Nonstationary Processes", *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. Assp. 33, No. 4, 1985, pp. 1461-1470.
- [6] Serrano-Iribarnegaray L.: „The modern space-phasor theory, Part I, 1st coherent formulation and its advantages for transient analysis of converter-fed AC machines", *ETEP*, vol. 3, No. 3, pp. 171-180.
- [7] Shan P., Beex A. A.: „High-resolution instantaneous frequency estimation based on time-varying AR modeling", *Proceedings of the IEEE-SP Int. Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, Pittsburgh, 1998, pp. 109-112.
- [8] Therrien C.W., *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.